第38卷 第6期
2021年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 6
Nov. 2021

# 1995—2020年新疆巴里坤湖面积时序变化及归因

王 振[1,2]， 李均力[1,3]， 包安明[1,3]， 张久丹[1,2]， 白 洁[1,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 新疆遥感与地理信息系统应用重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

**摘 要：**巴里坤湖是天山东部山间内陆封闭型湖泊，了解巴里坤湖的演变特征对于开展湖泊保护与生态环境治理具有重要意义。利用308景Landsat系列和Sentinel 2遥感影像提取1995—2020年湖泊水面的时间序列，并结合巴里坤气象站资料以及从遥感影像上提取的耕地面积数据，分析湖泊在气候变化与人类活动影响下的变化趋势。结果表明：湖泊变化经历了2个阶段：1995—2006年萎缩，从年均值57.33 $km^2$下降到35.53 $km^2$，下降速率1.98 $km^2 \cdot a^{-1}$，萎缩35.79%；2006—2020年扩张，从年均值35.53 $km^2$上升到46.59 $km^2$，上升速率0.79 $km^2 \cdot a^{-1}$，扩张31.12%。多年湖泊面积的月变化统计表明：湖泊在5月达到最大值(73.09±21.01)$km^2$，11月达到最小值(43.90±16.97)$km^2$。影响因素：1995—2006年，降水变化幅度较小，农业用水与蒸发量增加是巴里坤湖萎缩的主要原因；2006年后，巴里坤县出台多种湿地保护措施，耕地面积扩张趋势得到控制，降水显著增加与蒸发量减少成为湖泊面积扩张的主要原因。

**关键词：**巴里坤湖；湖面变化；遥感；影响因素；新疆

内陆湖泊是干旱区重要的水资源，对气候变化及人类活动的响应敏感，在维持区域社会经济发展和生态平衡中发挥重要作用[1-3]。近几十年来，水资源和湖泊资源开发利用的范围和强度不断加强，湖泊出现剧烈萎缩甚至消亡，内陆湖生态系统遭到严重破坏[4-7]。因此，研究干旱区内陆湖泊变化的时空过程，探究自然因素和人为因素对其产生的影响，对于湖泊的资源开发及生态环境保护具有重要意义[8-11]。然而，干旱区不少湖泊研究薄弱，缺乏水文观测资料，遥感技术逐渐成为缺资料地区湖泊信息重建的主要方式[12-13]。湖泊信息重建所需遥感数据量，根据湖泊地理位置和湖盆的不同存在差异。针对面积较大、有规律变化的高山湖泊遥感监测，年际的面积变化信息就能真实反映湖泊水量变化情况[14-15]。而对于湖泊季节性变化大的湖泊，需要获取湖泊月度面积变化信息[16-18]，特别是对于干涸型湖泊，湖盆平缓，水面变动频繁，少数几期影像难以全面刻画湖泊时序变化过程。不少学者从密集时序遥感影像数据获取月度面积变化信息[19-20]，研究表明Landsat系列卫星遥感影像可以精确描述湖泊水面随季节的波动变化过程。因此，针对状态不稳定的湖泊，采用密集的长时序遥感影像更有助于探究湖泊的变化机理及其对气候与人类活动的响应。

巴里坤湖是一个典型的高山内陆湖泊，湖盆平缓，水面季节性差异大，对气候变化与人类活动响应敏感。近几十年来，巴里坤内陆流域一直处于大规模的农业开发阶段，大量耕地严重挤占了入湖水量，造成湖泊萎缩及周边湿地退化，自1995年以来，湖泊被一分为二，并在湖西侧开发芒硝资源，湖区生态环境进一步被破坏。在国家“山水林田湖草”生态系统修复的背景下，探究近几十年来巴里坤湖变化及驱动因素，对湖泊生态系统治理、水资源合理开发具有重要意义。目前对巴里坤湖的研究主要针对湖泊沉积物重建古气候及环境变化[21-24]，而有关巴里坤湖泊近现代的面积变化研究较少，且仅采用几期遥感影像或研究的时长较短，无法清楚的描述湖泊变化的时间过程，对影响湖泊变化的关键因素不能做系统的研究[25-26]。针对这种剧烈变化，

**收稿日期：**2021-03-28； **修订日期：**2021-07-17
**基金项目：**新疆天山创新团队(2020D14016)；中国科学院战略先导项目(XDA200603030205)；中国科学院创新交叉团队项目(E0284001)；国家自然科学基金(41671034)
**作者简介：**王振(1995-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区水资源与湖泊变化机理研究. E-mail: wangzhen19@mails.ucas.ac.cn
**通讯作者：**李均力. E-mail: lijl@ms.xjb.ac.cn

状态不稳定的湖泊，需要采用密集时序的遥感影像监测湖泊的季节变化，分析湖泊水量变化的关键驱动因素。针对目前这些情况，本文利用具有长时间序列的Landsat影像，辅以Sentinel-2A/2B遥感数据提取1995—2020年湖泊面积的密集时序信息，重建湖泊月尺度的变化过程，并从年度、月度和空间上分析湖泊中部建坝后湖泊水情的变化，结合气候要素及农业开发情况，分析湖泊变化的关键驱动因素，从而为湖区生态系统的恢复与保护提供参考。

## 1　数据与方法

### 1.1　研究区概况

巴里坤湖(43°36′~43°43′N，92°43′~92°51′E)位于新疆哈密地区巴里坤哈萨克自治县县城西北约18 km处(图1)，发源于天山东段莫钦乌拉山南坡与巴里坤山北坡众多河流的尾闾，其中最大源流为柳条河，集水面积4500 km²。湖泊东侧河流两岸分布着大片的湿地、草原，耕地大部分分布在湿地的外围。近年来耕地逐步扩张，为了满足日益增长的农业用水需求，在河流处陆续修建了28个水库。湖区年均降水210 mm，年均蒸发为1620 mm，最大水深1.1 m，平均水深0.5 m[27]。巴里坤湖海拔约1575 m，由于地形、地貌的影响，从西北面来的汽团，在湖的东面山区形成降雨，因此湖泊东部水源丰富，山前水系发育较好，形成葱绿的草甸，并以地表径流与地下水的形式补给湖泊[28]。根据湖泊的沉积相分析，湖泊在8000~4000 a B.P.面积为600 km²，随后湖泊面积开始逐渐减小，现存湖泊面积波动较大，年均面积约60 km²[23]。湖内含有丰富的卤虫与芒硝资源，其中芒硝资源分布面积约100 km²，是巴里坤县的特色资源。1995年，巴里坤湖大规模的芒硝脱水工程，在湖中间建造的大坝使得湖泊被分为2个片区，东侧为卤水区，西侧为无水芒硝开采区。

### 1.2　数据来源及处理

采用1995—2020年Landsat系列卫星遥感影像(Landsat5 TM、Landsat7 ETM+和Landsat8 OLI)共304景(图2)，由美国地质调查局(USGS)处理后发布，所用的Landsat数据级别为L1TP，层次为T1，数据经过几何精准校正和地形校正，误差在半个像元之内，且在整个时间范围与各个传感器之间保持了一致的辐射度与几何质量。Landsat系列卫星已运行40多年，landsat5/7/8重访周期16 d，具备长时间重复覆盖同一地点的能力，其中轨道P139R030(139为轨道号，R030为行号)能够完整覆盖巴里坤湖。巴里坤湖位于高山内陆盆地，冬季湖泊边界被积雪或者湖冰覆盖，难以区分水陆边界，因此，这里仅分析3—11月没有积雪或湖冰覆盖时的湖面变化。由于云层遮挡有时会导致整个月份没有可用的Land-

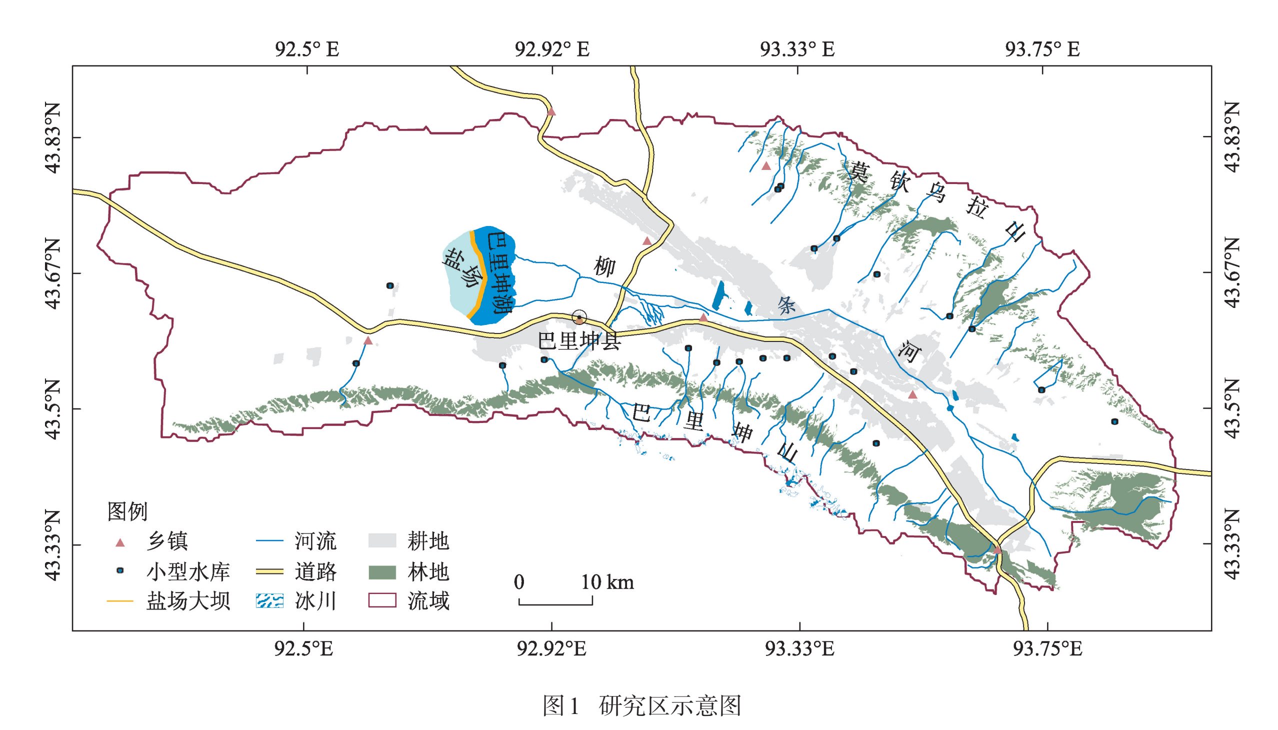



图1　研究区示意图

Fig. 1　Sketch map of the research area

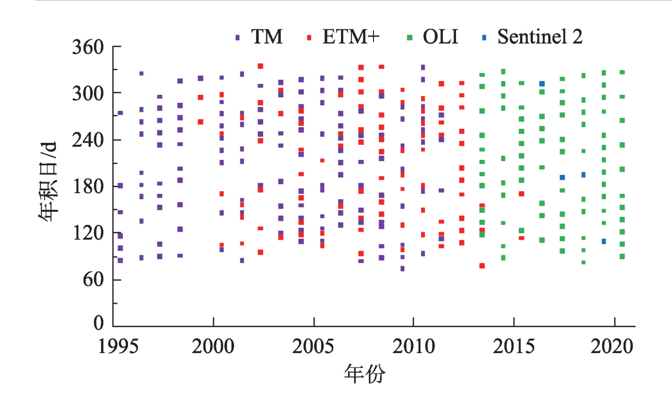



图2 1995—2020年研究区多源遥感数据分布

Fig. 2 Temporal distribution map of multi-source remote sensing data in the study area during 1995-2020

sat影像，本文采用Sentinel 2影像对2016—2019年月度数据不全的年份进行补全，共4景。为了建立完整的时序，还采用了2003年5月以后Landsat7 ETM+机载扫描行校正器发生故障后出现条带的数据，使用相邻时相湖面边界变化不大的影像对条带进行填充[29]。

基于归一化差值水体指数(NDWI)[30]，采用了一种半自动化的手段提取湖泊面积范围。首先使用ENVI+IDL平台构建NDWI，根据直方图确定分割阈值，将分割后湖泊面积栅格文件转为shapefile格式矢量文件，经过批量自动化处理后，再将提取结果采用ARCMAP进行人工编辑，以确保每期影像湖泊边界提取的正确性。气象数据来自巴里坤气象站地面气候资料日数据，选取与湖泊面积密切相关的降水、气温和蒸发量3个影响因子[31-32]。由于缺少近2 a的蒸发数据，年蒸发量数据只到2018年。从Landsat影像上提取巴里坤县1995—2020年耕地面积。根据哈密地区统计年鉴，巴里坤县农作物以春小麦为主，其次还有棉花、马铃薯、哈密瓜、蔬菜等经济作物，结合相关植物的物候以及遥感影像观察，选择6—8月的遥感影像在ArcMap上目视解译提取耕地面积，将不同月份影像提取的结果合成为年耕地面积。

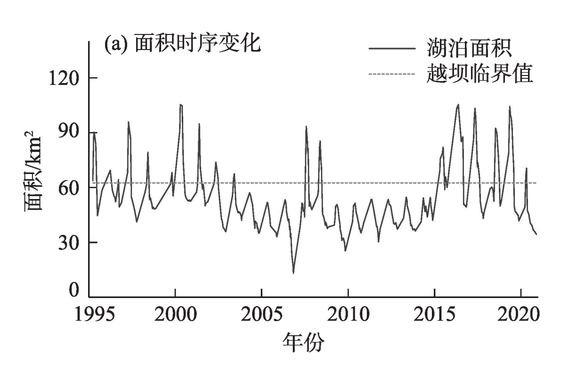
### 1.3 研究方法

采用遥感数据能够提取较为完整的湖面时序信息，通过折线图观察湖泊水面面积变化的趋势，采用年最大值、最小值和平均值分析湖泊年度变化趋势及其变化速率，通过M-K趋势检验分析湖泊的变化趋势的显著度[33-34]；使用月度信息较完整的多年数据分析湖泊的季节性变化特征；采用湖面边界变化显著的多时相矢量信息，分析建坝后巴里坤湖在空间上的变化特征。影响因素方面，通过各因子变化倾向率和M-K突变检验分析各个因素的变化特征，采用皮尔逊相关性分析(Person correlation analysis)分析水面面积与各因子相关性，进而对湖泊面积变化进行归因。

## 2 湖面动态变化分析

### 2.1 水面时序变化

由图3可知，1995—2020年湖泊面积变化剧烈，具有波动性特征，不同时段的年内波动振幅与均值具有显著差异，总体上湖泊面积呈现先下降后上升的趋势。湖泊面积的最小值13.10 km²出现在2006年11月，最大值105.44 km²出现在2000年4月。由于在湖区修建大坝，入湖水量较少时水面不能漫过大坝进入西侧，当水量较大时，湖水进入西侧会造成湖泊面积突增，因此湖泊面积年最大值变化幅度最大，波动剧烈。对未越过大坝的湖泊面积进行统计，湖泊越过大坝的临界面积为62.55 km²，超出此



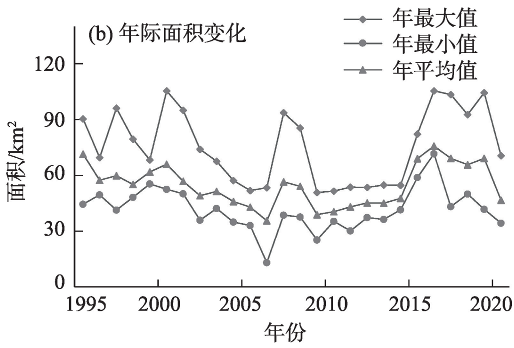




图3 1995—2020年巴里坤湖面积变化

Fig. 3 Area change of Barkol Lake from 1995 to 2020

值，湖水将漫过大坝进入西侧。

在湖泊变化趋势和变化速率方面，1995—2006年湖泊面积显著下降，从年均值57.33 $km^2$下降到35.53 $km^2$，下降速率1.98 $km^2 \cdot a^{-1}$，萎缩35.79%。其中，2000—2006年下降速率较1995—2000年更快，是湖泊萎缩的主要时段；2007—2008年湖泊面积剧烈上升，但没有改变湖泊萎缩的状况，随后急剧下降；2009—2020年湖泊面积显著增加，从年均值38.84 $km^2$上升到46.59 $km^2$，上升速率0.7 $km^2 \cdot a^{-1}$，扩张19.95%。

### 2.2　水面的季节变化

从图3可知，巴里坤湖水面面积年内波动较大，为了能够更加清晰地描述湖泊的月度变化过程，计算1995—2020年3—11月各月份多年均值及标准差，分析月度变化趋势。巴里坤湖总体的季节性变化趋势为3—5月湖泊面积上升，5月达到湖泊面积最大值，均值为73.09 $km^2$；5—11月湖泊面积持续萎缩，11月达到最小，均值为43.89 $km^2$；标准差最大的月份为5月（21.01 $km^2$），最小的月份为3月（12.75 $km^2$）。

由于在湖的南北方向建成一座大坝，将巴里坤湖分为东侧和西侧，东侧水位超过大坝高程时才能进入西侧。东侧湖水在未漫过大坝时，西侧没有地表径流补给，处于干涸状态。因此，湖水在漫过大坝和未漫过大坝的年份表现出不同的季节性特征。从图4可以看出，在湖水未漫过大坝的年份，湖泊面积的季节性变化较小，变化更为平滑，多年平均年内变化标准差8.84 $km^2$，湖泊在3—6月达到最大，11月萎缩至最小；湖水可以漫过大坝的年份，湖水进入西侧，面积突增，但由于缺乏持续的水源补给，西侧的水面会快速消失，因此，湖泊的季节性差异更大，多年平均年内变化标准差17.16 $km^2$，变化更为剧烈。

### 2.3　空间变化特征

为了描述巴里坤湖在空间上的变化模式，选取12个典型时相的湖泊边界，未漫过大坝与漫过大坝的边界各6个，分别叠加在2013年5月28日（未漫过大坝）与2000年4月14日（漫过大坝）的Landsat影像上，分析湖泊在建坝后的扩张与萎缩规律。从图5可以看出：

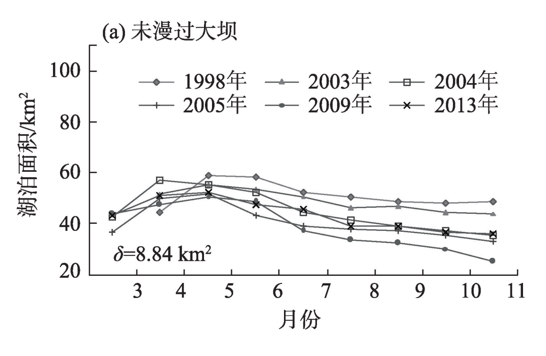
（1）当东侧水位低于大坝最低高程时，湖水被圈于东侧，湖泊呈现为月牙形。由于地形的差异，湖泊的南部和东南部靠近巴里坤山，坡度较陡，湖泊边界仅有小范围的变化，北部和东北部地势平坦，湖岸线变化明显，是湖泊在空间上的主要变化方向。

（2）当湖泊来水量较多时，大坝南端高程较低，东侧湖水将首先从大坝南端漫过进入西侧。由于巴里坤湖湖盆较为平坦，湖水在湖泊西侧由南向北迅速扩张，湖泊面积突增，西侧湖水边界达到的位置由漫过的水量决定，当漫过水量充足时，湖泊形状将恢复为未建坝前的近似椭圆形。巴里坤湖为季节性补给湖，且当地蒸发强烈，当东侧缺乏水量补给时，湖泊水位下降，停止向西侧漫溢。西侧形成的水面水浅而面大，极易被蒸干而消失，湖泊又将恢复为月牙形。因此，建坝后的巴里坤湖在空间上变化更为剧烈，且具有周期性特征。

## 3　面积变化原因

### 3.1　巴里坤湖区域气候变化特征

采用巴里坤气象站1990—2020年降水数据，绘制年均降水变化曲线，使用M-K秩相关分析法研究降水在时间上的变化趋势和突变点。由图6可知，



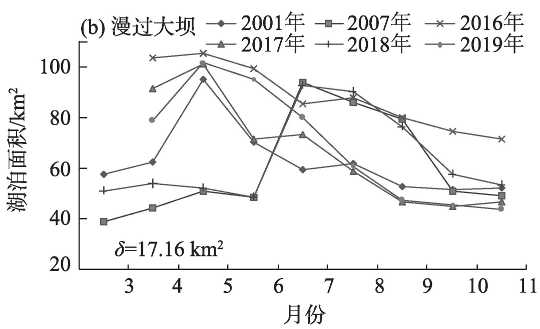




图4　巴里坤湖月面积变化

Fig. 4　The monthly area change curve of Barkol Lake

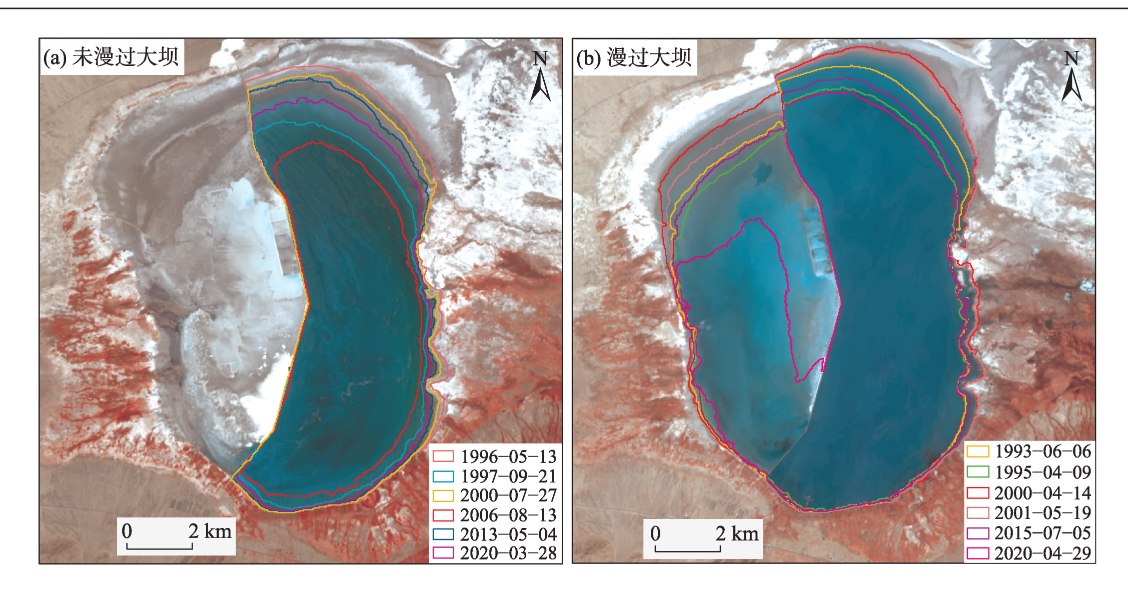



图5　巴里坤湖水面边界空间变化特征

Fig. 5　Spatial variation characteristics of water surface boundary in Barkol Lake

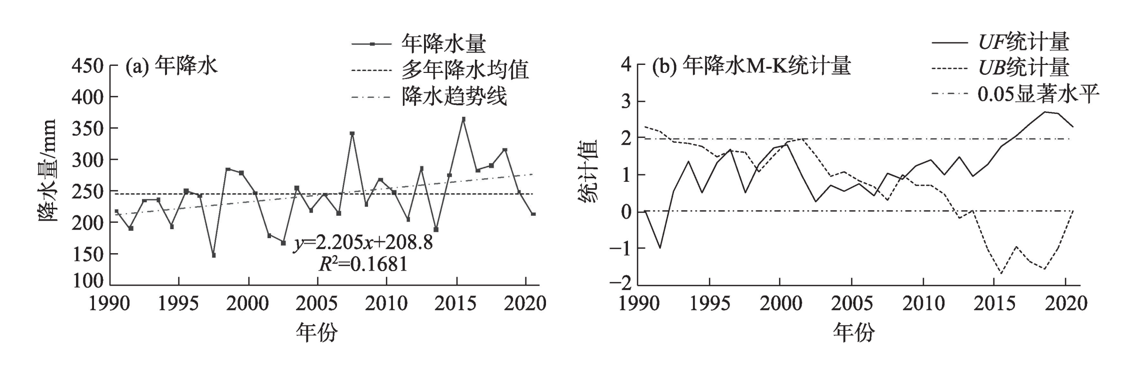



图6　1990—2020年巴里坤站降水变化趋势及M-K统计量变化

Fig. 6　Change trend of precipitation in Barkol meteorological station from 1990 to 2020 and M-K statistic change chart

1990—2020年降水量总体上呈现上升趋势，降水年际变化倾向率为22.05 mm·$(10a)^{-1}$。其中1990—2006年降水大多在年均值以下，降水距平为负；2007—2020年均降水大多在年均值之上。M-K检验结果显示，1990—1993年降水增加，但增加趋势不显著；1993—2006年降水波动平稳，未表现出明显的增加或减少的趋势；2007—2020年降水呈现上升的趋势，2016年以后，*UF*值大于1.96，增加趋势显著（$P<0.05$）。突变点为2006年，以2006年为分界线，1990—2006年平均降水为223.92 mm，2007—2020年为268.56 mm。

由图7可知，巴里坤湖流域1990—2020年气温

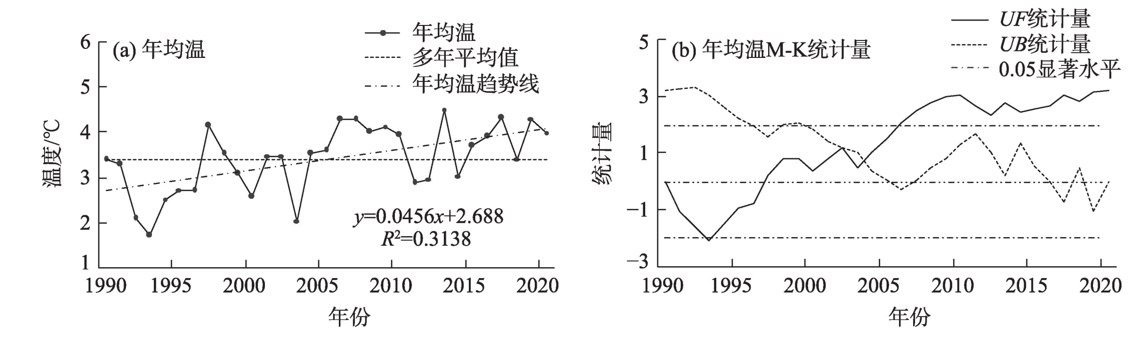



图7　1990—2020年巴里坤站气温变化趋势与M-K统计量变化

Fig. 7　Change trend of temperature in Barkol meteorological station from 1990 to 2020 and M-K statistic change chart

总体呈上升趋势,气温变化倾向率0.456 ℃·$(10a)^{-1}$,年均温为3.42 ℃,1990—2006年年均温大多在均值以下,2007—2020年大多在均值以上。M-K检验结果显示,1990—1993年气温为下降趋势,1994—2020年气温呈上升趋势,上升突变点为2004年,2006年后 *UF* 值大于1.96,上升趋势显著($P$<0.05)。

如图8所示,1990—2018年蒸发量表现为先上升后下降趋势,总体为下降趋势,蒸发量变化倾向率−91.69 mm·$(10a)^{-1}$,平均年蒸发量1196.81 mm。其中,1990—2006年表现为增加趋势,蒸发量大都在平均值以上,M-K检验表明,2005年增加趋势达到0.05显著水平。2007—2018年蒸发量表现为下降趋势,分析结果与已有的巴里坤县蒸发量变化研究一致[35]。

### 3.2 巴里坤湖区域耕地变化

流域内的耕地主要沿柳条河和巴里坤湿地呈现条形分布,结合相关农作物的生长期以及遥感影像的观察结果,采用6—8月Landsat影像目视解译提取巴里坤县1995—2020年耕地面积,绘制空间分布频率图(图9)。从变化趋势来看,巴里坤县的耕地面积总体上呈现出增长的趋势,与前人的研究结果较为一致[36],面积从1995年的309.9 km$^2$增长到2020年的368.8 km$^2$,其中1995—2007年耕地面积增速较快,2007年以后耕地面积变化较小。从空间分布频率来看,早期的耕地主要分布在靠近巴里坤湿地的两侧,并逐步向外围扩张。

### 3.3 巴里坤湖面积与影响因素的相关性

为了揭示不同阶段巴里坤湖水面面积与气候

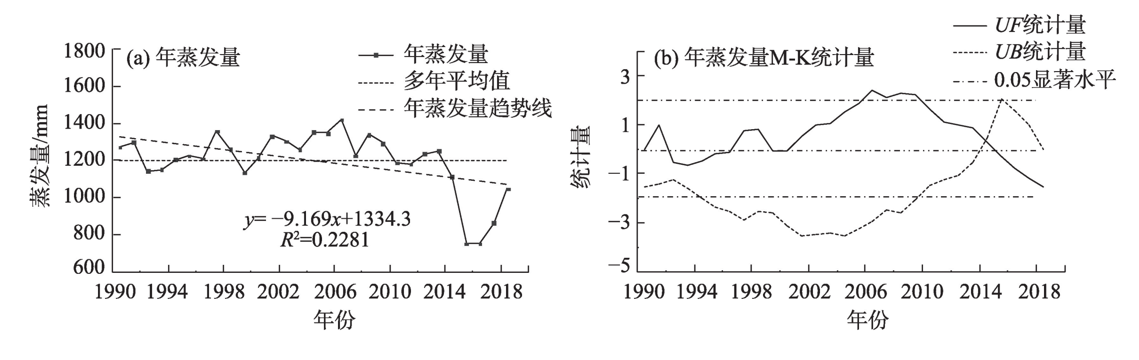



图8　1990—2018年巴里坤站蒸发量变化趋势与M-K统计量变化

Fig. 8　Change trend of evaporation in Barkol meteorological station from 1990 to 2018 and M-K statistic change chart

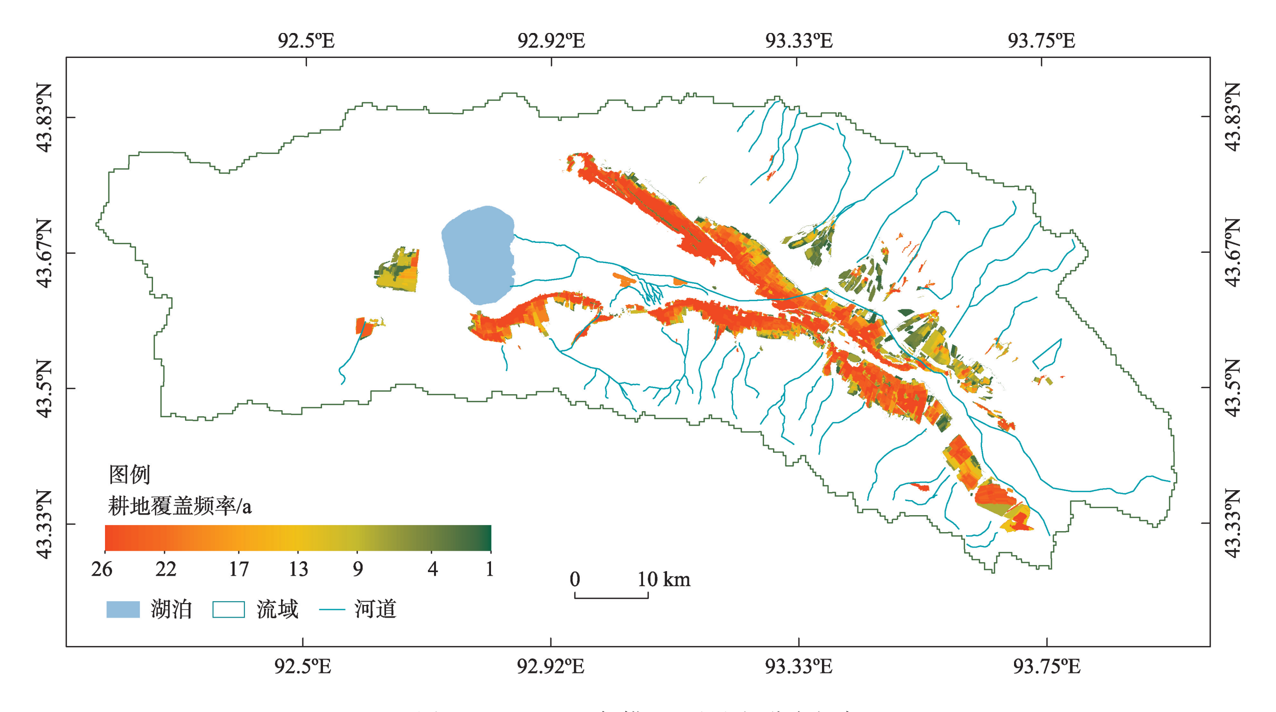



图9　1995—2020年耕地面积空间分布频率

Fig. 9　Frequency map of spatial distribution of cultivated land area from 1995 to 2020

表1 巴里坤湖水面面积与影响因子的Pearson相关系数

Tab. 1 Pearson correlation coefficient between water surface area and influencing factors of Barkol Lake

| 参数 | 时段 | 降水 | 温度 | 蒸发量 | 耕地面积 |
|---|---|---|---|---|---|
| Pearson相关系数 | 1995—2020年 | 0.373 | -0.135 | -0.659** | -0.102 |
| | 1995—2006年 | 0.184 | -0.513 | -0.726** | -0.744** |
| | 2007—2020年 | 0.529* | -0.139 | -0.836** | 0.461 |

注:*和**分别表示在0.05和0.01水平显著相关。

因素和人类干扰的响应关系,分别分析1995—2020年、1995—2006年湖泊水面下降阶段、2007—2020年上升阶段3个时段巴里坤湖水面面积与影响因子的相关性(表1)。Pearson相关分析表明,湖泊面积与气温在3个时段呈负相关,但相关性均不显著($P$>0.05),说明气温对湖泊面积有一定影响,但不是主要因素。降水仅在2007—2020年与湖泊水面面积呈显著正相关($P$<0.05),结合降水在该时段显著增加可知,降水增加是此阶段湖泊面积上升的一个重要因素。湖泊水面面积与蒸发量在3个时段都具有极为显著的负相关关系($P$<0.01),在整个研究时段都对湖泊面积变化有重要影响。耕地面积在1995—2006年与湖泊水面面积呈极为显著的负相关关系($P$<0.01),是湖泊面积萎缩阶段相关性最高的因素,这与耕地面积在此阶段持续增加有关,而在另外2个时段相关性较差。

## 4 讨 论

受人类干扰较小的内陆湖泊,由于流域的封闭性及极弱的人类活动使得湖泊水体面积对气候变化极其敏感,通常仅从气候上分析,就能发现湖泊变化的主导因素[37-38]。而巴里坤湖受到人类活动的强烈干预,气候只是影响湖泊面积的一个方面,结合人类活动因素综合分析才能对湖泊水面面积变化归因。从补给类型上来看,大气降水和季节性积雪融水形成的径流是巴里坤湖主要的补给方式,因此,上游农田灌溉的层层截流是影响入湖水量的重要因素。在降水变化较小的时段,如1995—2006年,巴里坤湖水面面积变化趋势由耕地用水量增加与蒸发量增加决定。而在降水变化趋势明显的情况下,如2007—2020年,降水仍然是湖泊面积变化的重要因素。从水量消耗上看,巴里坤湖水无外泄,属内流湖,蒸发是水量消耗的主要途径,分析表明,在整个研究时段内,蒸发量是影响湖泊面积变化的主要因素。由于气温变化较小,与湖泊面积变化的关系相关性较低,不是影响湖面变化的直接因素。

巴里坤湖作为新疆东部最大的内陆湖,减少人类活动对湖泊生态系统的破坏是保护其健康发展的重要措施。巴里坤县农业用水占水资源总利用量的79.59%,近几十年来,为满足不断扩张耕地面积的用水需求,巴里坤盆地地下水超采严重,造成了地下水位的持续下降[39]。根据巴里坤县柳条河流域地下水动态观测资料,1985—2007年巴里坤县城地下水水位下降2.9 m,奎苏镇与大河镇分别下降1.27 m、1.25 m,2005—2015年巴里坤县地下水位下降1.55 m[40]。地下水位下降将会减少地下潜水对湖泊水量的补给,造成湖泊面积的萎缩。同时,巴里坤县还在长流水或间歇性流水的山沟下游修建了数量较多、个体库容较小的水库,图1中标注了从Landsat影像上提取的水库位置,水库的扩建造成了河流被层层截流,入湖的水量日益减少。因此,耕地用水的增加会从地表水与地下水两方面减少巴里坤湖的水源补给。2006年,巴里坤县政府出台了《巴里坤湖生态功能保护管理暂行办法》,巴里坤耕地面积增长趋势得到遏制,高效节水灌溉面积逐年增加,在坚持"地有定额,户有总量"农业用水量化管理模式下,农业用水总量得到控制。根据哈密统计年鉴,2006年全地区高效节水面积达到1.92×10$^4$ hm$^2$,占灌溉面积的36%,2015年高效节水灌溉面积已经达到了7.33×10$^4$ hm$^2$,占地区总灌溉面积的82.7%。在耕地面积维持不变的情况下,高效节水灌溉面积增加,减少了农业用水量,从而使入湖水量增加。结合湖泊年际面积变化可知,2006年也是巴里坤湖由萎缩到增加的转折点,说明出台的办法对巴里坤湖面积的恢复起到了积极的作用。因此,建议巴里坤县继续加强对巴里坤湖的保护,落实湿地保护条例,继续扩大耕地高效节水面积,增加节水效率,控制严格控制农业新增用水,切实维护好

巴里坤湿地“绿肺”功能。

## 5 结 论

(1) 巴里坤湖面积年际变化特征表现为:1995—2006年萎缩,从年均值57.33 $km^2$下降至35.53 $km^2$,下降速率1.98 $km^2 \cdot a^{-1}$,萎缩35.79%;2006—2020年扩张,从年均值35.53 $km^2$上升到46.59 $km^2$,上升速率0.79 $km^2 \cdot a^{-1}$,扩张31.12%。总体季节性特征表现为:3—5月湖泊面积上升,6—11月下降,湖水未漫过大坝的年份,湖泊面积的季节性变化较小,变化更为平滑;湖水漫过大坝的年份,漫过后湖泊面积突增,季节性差异更大,变化更为剧烈。

(2) 空间变化特征表现为:东侧水位低于大坝最低高程时,湖水被圈于东侧,湖泊呈现为月牙形。湖泊边界南部和东南仅有小范围的变化,北部和东北部湖岸线变化明显,是湖泊在空间上的主要变化方向;东侧水位高于大坝最低高程时,从大坝南端漫过进入西侧,湖水在湖泊西侧由南向北迅速扩张,从而导致湖泊面积突增,当漫过水量充足时,湖泊形状将恢复为未建坝前的近似椭圆形。

(3) 1995—2006年,农业用水与蒸发量增加是巴里坤湖持续萎缩的主要原因;2006年以后,巴里坤县人民政府出台了多种湿地保护措施,严格控制耕地开发,并逐年增加节水灌溉面积,农业用水增加趋势的得到控制,降水显著增加以及蒸发量减小是湖泊面积逐渐增加的主要因素。

## 参考文献(References):


[1] 秦伯强, 张运林. 西部湖泊资源的开发与生态环境保护[J]. 中国科学院院刊, 2001, 16(1): 21-25. [Qin Boqiang, Zhang Yunlin. The resource exploitation and eco-environment protection of lakes in Western China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2001, 16(1): 21-25. ]

[2] Zhang F, Tiyip T, Johnson V C, et al. The influence of natural and human factors in the shrinking of the Ebinur Lake, Xinjiang, China, during the 1972-2013 period[J]. Environmental Monitoring Assessment, 2015, 187(1): 4128.

[3] Yang J M, Ma L G, Liu C Z, et al. Temporal-spatial variations and influencing factors of Lakes in inland arid areas from 2000 to 2017: A case study in Xinjiang[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 519-543.

[4] 王莺, 闫正龙, 高凡. 1957—2015年红碱淖湖水域面积时空变化监测及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 265-271. [Wang Ying, Yan Zhenglong, Gao Fan. Monitoring spatio-temporal changes of water area in Hongjiannao Lake from 1957 to 2015 and its driving forces analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 265-271. ]

[5] Wurtsbaugh W A, Miller C, Null S E, et al. Decline of the world's saline lakes[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(11): 816-821.

[6] Mahmood R, Jia S. Assessment of hydro-climatic trends and causes of dramatically declining stream flow to Lake Chad, Africa, using a hydrological approach[J]. Science of The Total Environment, 2019, 675: 122-140.

[7] Yu H L, Tu Z F, Yu G M, et al. Shrinkage and protection of inland lakes on the regional scale: A case study of Hubei Province, China [J]. Regional Environmental Change, 2020, 20(1): 4.

[8] 魏学. 近45 a达里诺尔湖面积演变对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 110-115. [Wei Xue. Response of Dali Lake area to climate factors in the past 45 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(2): 110-115. ]

[9] Wang J D, Sheng Y W, Tong T S D. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 251-269.

[10] 闫立娟, 郑绵平. 我国蒙新地区近40年来湖泊动态变化与气候耦合[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 463-472. [Yan Lijuan, Zheng Mianping. Dynamic changes of lakes in Inner Mongolia-Xinjiang Region and the climate interaction in the past forty years[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(4): 463-472. ]

[11] Yang X W, Wang N L, Chen A A, et al. Changes in area and water volume of the Aral Sea in the arid Central Asia over the period of 1960-2018 and their causes[J]. Catena, 2020, 191: 104566.

[12] 陈军, 汪永丰, 郑佳佳, 等. 中国阿牙克库木湖水量变化及其驱动机制[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1345-1356. [Chen Jun, Wang Yongfeng, Zheng Jiajia, et al. The changes in the water volume of Ayakekumu Lake based on satellite remote sensing data[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1345-1356. ]

[13] 王鹏飞, 郭云艳, 周康, 等. 1961—2018年呼伦湖水面面积变化特征及其对气候变化的响应[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 792-800. [Wang Pengfei, Guo Yunyan, Zhou Kang, et al. Variation of lake area of Hulun Lake during 1961-2018 and its response to climate change[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(4):792-800. ]

[14] 德吉央宗, 拉巴卓玛, 拉巴, 等. 1975—2013年西藏佩枯错湖面变化及分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1338-1347. [Dekey Yangzong, Laba Zhuoma, La Ba, et al. Lake area variation of Peiku Tso (lake) in 1975-2013 and its influential factors[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(6): 1338-1347. ]

[15] 拉巴卓玛, 德吉央宗, 拉巴, 等. 近40 a西藏那曲当惹雍错湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 480-489. [Laba Zhuoma, Deji Yangzong, La Ba, et al. Remote sensing analysis on the area variations of Tangra Yutso in Tibetan Plateau over the past 40 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 480-489. ]

[16] 李均力, 胡汝骥, 黄勇, 等. 1964—2014年柴窝堡湖面积的时序变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 417-427. [Li Junli, Hu Ruji, Huang Yong, et al. Spatial-temporal characterstics of Chaiwopu Lake area change and its driving factors from 1964 to 2014[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 417-427. ]

[17] 李均力, 白洁, 王亚俊. 1964—2015年阿牙克库木湖时序变化的气候响应[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 85-95. [Li Junli, Bai Jie, Wang Yajun. Time series area of the Ayakkum Lake and its response to climate change[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 85-95. ]

[18] 王宇, 李均力, 郭木加甫, 等. 1989-2014年赛里木湖水面面积的时序变化特征[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 851-860. [Wang Yu, Li Junli, Guomu Jiapu, et al. Time-series analysis of Sayram Lake area changes during 1989- 2014[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 851-860. ]

[19] 彭焕华, 张静, 梁继, 等. 东洞庭湖水面面积变化监测及其与水位的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2770-2780. [Peng Huanhua, Zhang Jing, Liang Ji, et al. Monitoring the changes of water area and its relation with water levels of hydrological station in East Dongting Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12): 2770-2780. ]

[20] 曹国亮, 李天辰, 陆垂裕, 等. 干旱区季节性湖泊面积动态变化及蒸发量——以艾丁湖为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1095-1104. [Cao Guoliang, Li Tianchen, Lu Chuiyu, et al. Dynamic variation and evaporation of seasonal lakes in arid areas: A case study for the Aiding Lake[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1095-1104. ]

[21] 钟巍, 张进, 尹焕玲, 等. 新疆巴里坤湖全新世湖泊沉积物稳定氮同位素的气候与环境意义研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2013, 45(6): 182-188. [Zhong Wei, Zhang Jin, Yin Huanling, et al. Study on the climatic and environmental implication of stable nitrogen isotopes from the holocene lacustrine sediments in Balikun Lake in Xinjiang[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition) , 2013, 45(6): 182-188. ]

[22] An C B, Lu Y B, Zhao J J, et al. A high-resolution record of Holocene environmental and climatic changes from Lake Balikun (Xinjiang, China): Implications for central Asia[J]. The Holocene, 2011, 22(1): 43-52.

[23] 陈永强, 钟巍, 谭玲玲, 等. 西风区湖泊沉积物中砷元素对气候环境变化的响应研究——以新疆巴里坤湖为例[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 83-90. [Chen Yongqiang, Zhong Wei, Tan Lingling, et al. Climate evolution response to arsenic component from lacustrine sediments in westerly region: A case study of Barkol Lake, Xinjiang[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition) , 2015, 47(6): 83-90. ]

[24] 汪海燕, 岳乐平, 李建星, 等. 全新世以来巴里坤湖面积变化及气候环境记录[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 93-100. [Wang Haiyan, Yue Leping, Li Jianxing, et al. Changing of the lake area and records of climate and environment of Barkol Lake during Holocene[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 93-100. ]

[25] 曹相东, 李秀花, 武胜利. 近30年巴里坤湖水域面积动态变化与气象因素分析[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(4): 848-851. [Cao Xiangdong, Li Xiuhua, Wu Shengli. The dynamic changes of Barkol Lake area and meteorological factors of recent 30 years[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(4): 848-851. ]

[26] 邢文渊, 肖继东, 沙依然, 等. 基于MODIS影像的湖泊动态变化遥感监测——以巴里坤湖为例[J]. 草业科学, 2009, 26(7): 28-31. [Xing Wenyuan, Xiao Jidong, Sha Yiran, et al. Remote sensed monitoring of lake dynamic change based on MODIS image: A case study of the Barkol Kazakhstan autonomous county[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(7): 28-31. ]

[27] 王世江. 中国新疆河湖全书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. [Wang Shijiang. Encyclopaedia of Xinjiang Rivers and Lakes[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011. ]

[28] 郑松林, 罗丽萍. 巴里坤湖水质18年变化及水资源保护方案研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 85-88, 119. [Zheng Songlin, Luo Liping. Variation of water quality in Balikun Lake in the last 18 years and water resource protection strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(8): 85-88, 119. ]

[29] Scaramuzza P, Micijevic E, Chander G. SLC gap-filled products: Phase one methodology[EB/OL]. http: //landsat.usgs.gov/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf, 2008-07-18.

[30] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 17(7): 1425-1432.

[31] Zhang Y F, Liang W T, Liao Z L, et al. Effects of climate change on lake area and vegetation cover over the past 55 years in Northeast Inner Mongolia grassland, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(1/2): 13-25.

[32] 张娜, 乌力吉, 刘松涛, 等. 呼伦湖地区气候变化特征及其对湖泊面积的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 192-197. [Zhang Na, Wu Liji, Liu Songtao, et al. The characteristics of climate change and its influence on water area of Hulun lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 192-197. ]

[33] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[34] 李玉焦, 陈亚宁, 张齐飞, 等. 1960—2018年博斯腾湖水位变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 48-58. [Li Yujiao, Chen Yaning, Zhang Qifei, et al. Analysis of the change in water level and its influencing factors on Bosten Lake from 1960 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 48-58. ]

[35] 卓世新, 冯桂红, 石侃. 近55 a巴里坤降水量与蒸发量变化[J]. 气候变化研究快报, 2016, 5(2): 78-85. [Zhuo Shixin, Feng Guihong, Shi Kan. Precipitation and evaporation change in the Balikun over last 55 years[J]. Climate Change Research Letters, 2016, 5(2): 78-85. ]

[36] 高伟, 李小锋, 郭正刚. 基于3S技术的荒漠绿洲土地利用/土地覆被变化特征——以新疆巴里坤县为例[J]. 草业科学, 2012,

29(10): 1533-1538. [Gao Wei, Li Xiaofeng, Guo Zhenggang. Features of land use/land cover change in the oasis-desert region based on 3S technologies: A case study of the Barkol Kazakhstan autonomous county[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(10): 1533-1538. ]

[37] 李东昇, 张仁勇, 崔步礼, 等. 1986—2015年青藏高原哈拉湖湖泊动态对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 501-512. [Li Dongsheng, Zhang Renyong, Cui Buli, et al. Response of lake dynamics to climate change in the Hala Lake Basin of Tibetan Plateau from 1986 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 501-512. ]

[38] 除多, 普穷, 拉巴卓玛, 等. 近40 a西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 494-502. [Chu Duo, Pu Qiong, Laba Zhuoma, et al. Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40 a [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3): 494-502. ]

[39] 李续续, 居马·吐尔逊, 伊永强. 新疆巴里坤县地下水开发利用及环境地质问题[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(12): 119-122. [Li Xuxu, Juma Tuerxun, Yi Yongqiang. Groundwater development and utilization and environmental geological problems in Barkol County, Xinjiang[J]. West-China Exploration Engineering, 2014, 26 (12): 119-122. ]

[40] 李筱艺. 哈密地区农牧业水资源利用中的问题及对策分析[D]. 成都: 四川农业大学, 2017. [Li Xiaoyi. Analysis on the Problems and Countermeasures of Water Resources Utilization of Agriculture and Animal Husbandry in Hami Area[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017. ]



# Temporal variation in the Barkol Lake area and its driving factors in 1995-2020

WANG Zhen[1,2], LI Junli[1,3], BAO Anming[1,3], ZHANG Jiudan[1,2], BAI Jie[1,3]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of GIS & RS Application Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** Barkol Lake is a closed inland lake in the eastern part of the Tianshan Mountains. Its evolutionary characteristics should be elucidated to develop lake protection and manage its ecological environment. In this study, 308 Landsat series and Sentinel 2 remote sensing images were used to extract the time series of the lake water surface from 1995 to 2020. Data from Barkol Meteorological Station were combined with the cultivated land area data extracted from remote sensing images to analyze the trend of changes in the lake under the influence of climate change and human activities through time series analysis, correlation analysis, Mann-Kendall trend analysis, and abrupt change test method. Results show that changes in the had two stages. In 1995-2006, the annual mean decreased from 57.33 $km^2$ to 35.53 $km^2$ at a decreasing rate of 1.98 $km^2 \cdot a^{-1}$, thereby shrinking by 35.79%. In 2006-2020, the annual mean increased from 35.53 $km^2$ to 46.59 $km^2$ at an increasing rate of 0.79 $km^2 \cdot a^{-1}$ and an expansion rate of 31.12%. The lake expanded and shrank mainly in the east and north of the lake. Statistical analysis on monthly changes in the lake area for many years revealed that the lake reached the maximum value of (73.09±21.01) $km^2$ in May and the minimum value of (43.90±16.97) $km^2$ in November. The seasonal variation in the year when the lake water crossed the dam was higher than that in the year when it did not cross the dam. As for the influencing factors, in 1995-2006, precipitation slightly changed. The shrinking of Barkol Lake was mainly attributed to the increase in evaporation and agricultural water use. After 2006, Barkol Kazakh Autonomous County introduced various wetland protection measures, and the expansion trend of the cultivated land area was controlled. Consequently, the significant increase in precipitation and the decrease in evaporation became the main reasons for the expansion of the lake area.

**Keywords:** Barkol Lake; lake area change; remote sensing; influencing factors; Xinjiang